能量限饲对肉鸡生长性能、血清指标及免疫功能的影响

霍文颖[1,2]　王志祥[1]　黄艳群[1]　陈　文[1*]

(1.河南农业大学饲料营养河南省工程实验室，郑州　450002；2.河南牧业经济学院，郑州　450046)

摘　要：本试验旨在研究不同能量限饲水平对肉鸡生长性能、血清指标、外周血T淋巴细胞亚群和免疫功能的影响。选取22日龄科宝（Cobb）肉鸡72只，随机分为3个组，分别为对照组、试验1组（15%能量限饲组）和试验2组（30%能量限饲组），每组24个重复，每个重复1只鸡。试验期20 d。分别于28、42日龄时屠宰取样。结果表明：1）15%和30%能量限饲组肉鸡的末重、平均日采食量、平均日增重均显著低于对照组(P<0.05)，30%能量限饲组显著低于15%能量限饲组(P<0.05)；30%能量限饲组22~42日龄时的料重比显著高于15%能量限饲组和对照组(P<0.05)。2）与对照组相比，15%和30%能量限饲显著增加28日龄时肉鸡的血清免疫球蛋白M(IgM)含量和42日龄时的血清免疫球蛋白G(IgG)、免疫球蛋白A(IgA)含量(P<0.05)，显著降低28日龄时的血清高密度脂蛋白胆固醇含量(P<0.05)；30%能量限饲显著增加28日龄时的血清IgA含量(P<0.05)，显著降低28、42日龄时的血清总胆固醇含量以及42日龄时的血清甘油三脂和高密度脂蛋白胆固醇含量(P<0.05)。3）与对照组相比，30%能量限饲显著增加28日龄时肉鸡的外周血CD_8^+ T淋巴细胞百分含量(P<0.05)。4）与对照组相比，30%能量限饲显著增加28日龄时肉鸡的法氏囊指数和42日龄时的脾脏指数(P<0.05)。由此可见，能量限饲降低了肉鸡的生长性能，提高了免疫功能，降低了血脂水平。

关键词：能量限饲；肉鸡；免疫球蛋白；T淋巴细胞亚群；血脂水平

中图分类号：S831

通常人们认为肉鸡在遗传背景一定的情况下采食量越大上市体重就越大，因此在生产实际

收稿日期：2018-02-03

基金项目：国家自然科学基金（31372329）

作者简介：霍文颖（1974—），女，河南杞县人，讲师，博士，从事动物营养与饲料科学研究。E-mail: joycehuohuo@aliyun.com

*通信作者：陈　文，教授，硕士生导师，E-mail: cchenwen@aliyun.com

中一般肉鸡自由采食的能量是其维持需要的2~3倍[1]，结果导致肉鸡脂肪大量沉积、新陈代谢及骨代谢失调、免疫力降低、死亡率增加，猝死症、腹水症等疾病频发[2-4]，同时沉积单位脂肪比沉积单位瘦肉消耗更多能量，降低饲料利用效率[5]，因此减少脂肪沉积是现代肉鸡生产必须面对的一个问题。试验证明，采用适度水平的限制饲养，可有效降低动物腹水症、猝死症等各类代谢疾病的发生率及其总死亡率，增强机体的免疫功能，改善肉品质，降低料重比，提高生产效益[6-8]。徐良梅等[9]、李金峰等[10]研究肉种鸡能量限饲对子代肉鸡的影响，结果发现，母代肉种鸡进行20%能量限饲可显著提高28日龄子代肉鸡的腿肌肌节长度、血清总胆固醇和生长激素含量，显著降低腹脂率。研究显示，免疫与代谢在生理和疾病中相互影响，一方面，天然和获得性免疫系统都参与非免疫性疾病，如肥胖产生代谢和免疫方面异常，进而导致对心血管疾病、II型糖尿病、癌症和神经退行性病变的易感；另一方面，免疫细胞（如淋巴细胞和白细胞）在多层面受到内部能量代谢的调节[11]。这种存在于免疫应答与代谢之间的相互作用揭示了正确调节和管理能量摄入、保持二者之间的微妙平衡对于机体健康至关重要[12]。能量限食因成为目前发现的能延长人类寿命、增进健康的有效方法而备受关注[13]。有关能量限饲的研究已从脊椎动物扩展到几乎所有的无脊椎动物，但研究结果不一致，机制也存在争议[14]。本试验旨在研究不同能量限饲水平对肉鸡生长性能、血清指标及免疫功能的影响，为肉鸡生产中合理限饲的应用提供理论依据；同时鸡作为一种模式动物，对其血清生化指标及免疫功能的研究，可为进一步探索能量限饲增进动物健康和延长寿命的潜在机制提供物种间的比较。

1 材料与方法

1.1 试验动物与试验设计

选取1日龄健康科宝（Cobb）雏鸡1 000只，网上饲养，按照NRC(1994)建议的肉小鸡营养需要量配制饲粮，自由采食，常规饲养管理；饲养至22日龄时，从1 000只肉鸡中挑选出体重相似的雄性肉鸡72只，逐只称重后，随机分为3个组，分别为对照组、试验1组（15%能量限饲组）和试验2组（30%能量限饲组），每组24个重复，每个重复1只鸡，单笼饲养。

1.2 试验饲粮

对照组饲粮按照NRC(1994)建议的肉中鸡营养需要量配制成颗粒料，依照Cobb雄性肉鸡相

应日龄的推荐采食量每天每只定量供给。3 组饲粮的代谢能水平保持一致，调整试验 1 组和试验 2 组除代谢能之外的其他养分含量，以对照组为基础控制试验 1 组和试验 2 组的采食量分别为对照组的 85%和 70%，保证试验 1 组和试验 2 组摄入的能量比对照组分别低 15%和 30%，而其他各养分摄入量与对照组相同。试验饲粮组成及营养水平见表 1。

1.3　饲养管理

本试验在河南农业大学畜牧站动物实验房进行，试验期 20 d。试验期内鸡只定量采食、充足饮水，正常饲养管理，按照肉鸡常规免疫程序免疫接种。每天以重复为单位分别记录各组的日采食量，观察试验鸡的精神状态、食欲及粪便情况，记录死亡鸡只数。

表 1　试验饲粮组成及营养水平（风干基础）

Table 1　Composition and nutrient levels of experimental diets (air-dry basis)　%

项目 Items	对照组 Control group	试验 1 组 Trial group 1	试验 2 组 Trial group 2
原料 Ingredients			
玉米 Corn	65.75	54.88	39.96
去皮豆粕 Dehulled soybean meal	22.99	29.48	40.63
鱼粉 Fish meal	3.50	4.12	5.00
玉米蛋白粉 Corn protein meal	2.00	3.50	4.50
豆油 Soybean oil	2.30	3.25	5.00
石粉 Limestone	1.22	1.36	1.55
磷酸氢钙 $CaHPO_4$	1.10	1.40	1.85
L–赖氨酸盐酸盐 *L*-Lys•HCl	0.10	0.80	
DL–蛋氨酸 *DL*-Met	0.04	0.05	0.08
氯化胆碱 Choline chloride (50%)	0.20	0.24	0.29
食盐 NaCl	0.30	0.35	0.43
预混料 Premix[1)]	0.50	0.57	0.71

合计 Total	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels2)			
代谢能 ME/(MJ/kg)	12.97	12.97	12.97
粗蛋白质 CP	20.00（20.03）	23.50（23.45）	28.58（28.54）
粗脂肪 EE	5.27	6.05	7.49
钙 Ca	0.90（0.91）	1.06（1.07）	1.29（1.27）
总磷 TP	0.60（0.61）	0.69（0.68）	0.82（0.81）
有效磷 AP	0.40	0.47	0.57
赖氨酸 Lys	1.11	1.31	1.59
蛋氨酸 Met	0.40	0.47	0.57

1)预混料为每千克饲粮提供 The premix provided the following per kg of diets：VA 1 150 IU，VB_1 2.5 mg，VB_2 6.7 mg，VB_6 6 mg，VB_{12} 0.05 mg，VD_3 3 500 IU，VE 25 IU，VK_3 4.8 mg，生物素 biotin 2 mg，叶酸 folic acid 2.8 mg，泛酸 pantothenic acid 11 mg，烟酸 nicotinic acid 30 mg，Cu (as copper sulfate) 8 mg，Fe (as ferrous sulfate) 80 mg，Mn (as manganese sulfate) 82 mg，Zn (as zinc sulfate) 60 mg，I (as potassium iodide) 0.40 mg，Se (as sodium selenite) 0.30 mg。

2)括号内为实测值，其余均为计算值。The values in brackets were measured values, while the others were calculated values.

1.4 测定指标与方法

1.4.1 生长性能

每天定时称料，记录每只鸡的日采食量。分别于 28、42 日龄禁食 12 h 后，早上空腹称重，根据初重、末重、日采食量，计算各个阶段鸡只的平均日增重（ADG）、平均日采食量（ADFI）、料重比（F/G）。

1.4.2 血清指标

分别于 28、42 日龄时，每组分别挑选 10 只体重相近的试验鸡，翅下静脉采血置于采血管中，室温静置 2 h 后 3 000 r/min 离心 10 min 制备血清，用免疫比浊法测定血清免疫球蛋白 A（IgA）、

免疫球蛋白G（IgG）和免疫球蛋白M（IgM）含量；用全自动生化分析仪（RA-1000，Bayer公司，美国）测定血清葡萄糖（GLU）、甘油三酯（TG）、总胆固醇（TC）、高密度脂蛋白胆固醇（HDL-C）、低密度脂蛋白胆固醇（LDL-C）含量。

1.4.3 外周血T淋巴细胞亚群

分别于28、42日龄时，每组分别挑选10只体重相近的试验鸡，取新鲜抗凝血1 mL，与磷酸盐缓冲液（PBS）1:1混匀后，小心加于2 mL细胞分离液液面上，1 500 r/min离心15 min，此时离心管中由上至下分为4层，依次为血浆层、环状乳白色淋巴细胞层、分离液层、红细胞层；小心收集淋巴细胞放入含5 mL细胞洗涤液的试管中，充分混匀后，2 000 r/min离心15 min；沉淀反复洗2次即得所需淋巴细胞。流式细胞计数法测定外周血CD_3^+、CD_4^+和CD_8^+ T淋巴细胞的百分含量。

1.4.4 免疫器官指数

分别于28、42日龄时，每组分别挑选10只体重相近的试验鸡屠宰，解剖取胸腺、脾脏、法氏囊并称重，计算免疫器官指数，公式为：

免疫器官指数=免疫器官重（g）/鸡只活重（kg）。

1.5 数据统计与分析

数据采用SPSS 20.0软件进行单因素方差分析（one-way ANOVA），采用Duncan氏法多重比较进行差异显著性检验。P<0.05作为差异显著性判断标准，结果以平均值±标准差（mean±SD）表示。

2 结　果

2.1 能量限饲对肉鸡生长性能的影响

由表2可知，22~28日龄时，与对照组相比，试验1组和试验2组肉鸡的末重、平均日采食量、平均日增重均显著降低(P<0.05)，试验2组显著低于试验1组(P<0.05)；各组的料重比无显著差异(P>0.05)。22~42日龄时，与对照组相比，试验1组和试验2组肉鸡的末重、平均日采食量、平均日增重均显著降低(P<0.05)，试验2组显著低于试验1组(P<0.05)；试验2组的料重比显著高于试验1组和对照组(P<0.05)，试验1组与对照组无显著差异(P>0.05)。

表 2　能量限饲对肉鸡生长性能的影响

Table 2　Effects of energy restriction on growth performance of broilers (*n*=24)

项目 Items	对照组 Control group	试验 1 组 Trial group 1	试验 2 组 Trial group 2
初重 Initial weight/g	726.40±40.40	719.44±46.27	719.75±48.20
22~28 日龄 22 to 28 days of age			
末重 Final weight/g	1 341.70±60.32^{a}	1 243.44±33.34^{b}	1 183.25±48.22^{c}
平均日采食量 ADFI/(g/d)	136.49±11.75^{a}	118.95±0.95^{b}	98.20±0.00^{c}
平均日增重 ADG/(g/d)	87.90±9.22^{a}	74.86±4.77^{b}	66.21±4.22^{c}
料重比 F/G	1.56±0.10	1.59±0.10	1.56±0.10
22~42 日龄 22 to 42 days of age			
末重 Final weight/g	2 877.27±46.86^{a}	2 557.71±77.53^{b}	2 091.94±39.21^{c}
平均日采食量 ADFI/(g/d)	191.42±1.51^{a}	163.40±0.23^{b}	123.35±1.86^{c}
平均日增重 ADG/(g/d)	106.22±4.30^{a}	95.43±5.84^{b}	62.34±2.94^{c}
料重比 F/G	1.87±0.13^{b}	1.72±0.11^{b}	2.00±0.05^{a}

同行数据肩标不同小写字母表示差异显著（P<0.05），相同或无字母表示差异不显著（P>0.05）。下表同。

In the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference (P<0.05), while with the same or no letter superscripts mean no significant difference (P>0.05). The same as below.

2.2　能量限饲对肉鸡血清指标的影响

由表 3 可知，28 日龄时，试验 1 组和试验 2 组肉鸡的血清 IgM 含量显著高于对照组(P<0.05)，试验 1 组与试验 2 组无显著差异(P>0.05)；试验 1 组和试验 2 组的血清 IgG 含量与对照组相比有增加趋势(P>0.05)；试验 2 组的血清 IgA 含量显著高于对照组(P<0.05)。42 日龄时，试验 1

组和试验 2 组肉鸡的血清 IgG 和 IgA 含量显著高于对照组(P<0.05)。

表 3 能量限饲对肉鸡血清免疫球蛋白含量的影响

Table 3 Effects of energy restriction on serum immunoglobulin contents of broilers mg/mL

项目 Items	对照组 Control group	试验 1 组 Trial group 1	试验 2 组 Trial group 2
28 日龄 28 days of age			
免疫球蛋白 M IgM	1.90±0.05^{b}	2.45±0.19^{a}	2.36±0.06^{a}
免疫球蛋白 G IgG	4.87±0.21	5.33±0.28	5.16±0.45
免疫球蛋白 A IgA	1.61±0.06^{b}	1.78±0.04^{ab}	1.91±0.09^{a}
42 日龄 42 days of age			
免疫球蛋白 M IgM	1.99±0.18	2.21±0.26	2.37±0.29
免疫球蛋白 G IgG	4.91±0.18^{b}	6.40±0.22^{a}	6.01±0.51^{a}
免疫球蛋白 A IgA	1.70±0.08^{b}	1.96±0.14^{a}	1.84±0.09^{a}

由表 4 可知，28 日龄时，试验 2 组肉鸡的血清总胆固醇含量显著低于对照组(P<0.05)，试验 1 组低于对照组(P>0.05)；试验 1 组和试验 2 组的血清高密度脂蛋白胆固醇含量显著低于对照组(P<0.05)，试验 2 组显著低于试验 1 组(P<0.05)；各组的血清葡萄糖、甘油三酯和低密度脂蛋白胆固醇含量无显著差异(P>0.05)。42 日龄时，试验 2 组肉鸡的血清总胆固醇含量显著低于对照组(P<0.05)；试验 2 组的血清甘油三酯和高密度脂蛋白胆固醇含量显著低于试验 1 组和对照组(P<0.05)；试验 1 组和试验 2 组的血清葡萄糖含量低于对照组(P>0.05)。

表 4 能量限饲对肉鸡血清生化指标的影响

Table 4 Effects of energy restriction on serum biochemical indexes of broilers mmol/L

项目 Items	对照组 Control group	试验 1 组 Trial group 1	试验 2 组 Trial group 2
28 日龄 28 days of age			
葡萄糖 GLU	12.61±0.44	13.59±0.44	13.71±0.44

总胆固醇 TC	4.46±0.12^{a}	4.16±0.12^{ab}	3.81±0.12^{b}
甘油三酯 TG	0.49±0.03	0.45±0.01	0.42±0.01
高密度脂蛋白胆固醇 HDL-C	3.90±0.11^{a}	3.55±0.11^{b}	3.03±0.11^{c}
低密度脂蛋白胆固醇 LDL-C	0.74±0.07	0.69±0.07	0.59±0.07
42 日龄 42 days of age			
葡萄糖 GLU	14.76±0.56	13.55±0.56	12.75±1.12
总胆固醇 TC	4.86±0.12^{a}	4.06±0.11^{ab}	3.91±0.10^{b}
甘油三酯 TG	0.48±0.01^{a}	0.40±0.03^{a}	0.30±0.01^{b}
高密度脂蛋白胆固醇 HDL-C	3.59±0.16^{a}	3.41±0.16^{a}	2.54±0.31^{b}
低密度脂蛋白胆固醇 LDL-C	0.78±0.07	0.79±0.07	0.60±0.13

2.3 能量限饲对肉鸡外周血 T 淋巴细胞亚群的影响

由表 5 可知，28 日龄时，试验 1 组和试验 2 组肉鸡的外周血 CD_3^+和 CD_4^+ T 淋巴细胞百分含量高于对照组(P>0.05)；试验 2 组的外周血 CD_8^+ T 淋巴细胞百分含量显著高于对照组和试验 1 组(P<0.05)。42 日龄时，试验 1 组和试验 2 组的外周血 CD_3^+、CD_4^+和 CD_8^+ T 淋巴细胞百分含量都高于对照组，但无显著差异(P>0.05)。

表 5 能量限饲对肉鸡外周血 T 淋巴细胞亚群的影响

Table 5 Effects of energy restriction on peripheral T lymphocyte subsets of broilers %

项目 Items	对照组 Control group	试验 1 组 Trial group 1	试验 2 组 Trial group 2
28 日龄 28 days of age			
CD_3^+	29.26±2.51	30.63±2.28	37.04±4.18
CD_4^+	20.17±2.97	21.63±3.18	24.09±2.97
CD_8^+	8.81±1.34^{b}	8.79±1.26^{b}	13.55±1.26^{a}
42 日龄 42 days of age			
CD_3^+	25.61±3.28	28.90±3.28	27.70±3.51

CD_4^+	15.03±4.86	17.41±2.90	19.14±2.97
CD_8^+	10.14±1.26	10.56±1.26	13.03±2.05

2.4 能量限饲对肉鸡免疫器官指数的影响

由表 6 可知，28 日龄时，试验 2 组肉鸡的法氏囊指数显著大于对照组(P<0.05)，试验 1 组与对照组相比无显著差异(P>0.05)；各组的胸腺指数和脾脏指数无显著差异(P>0.05)。42 日龄时，试验 2 组肉鸡的脾脏指数显著大于试验 1 组和对照组(P<0.05)；各组的法氏囊指数和胸腺指数无显著差异(P>0.05)。

表 6 能量限饲对肉鸡免疫器官指数的影响

Table 6 Effects of energy restriction on immune organ indexes of broilers g/kg

项目 Items	对照组 Control group	试验 1 组 Trial group 1	试验 2 组 Trial group 2
28 日龄 28 days of age			
法氏囊指数 Bursa of Fabricius index	$0.18±0.05^b$	$0.23±0.07^{ab}$	$0.25±0.06^a$
胸腺指数 Thymus index	0.39±0.09	0.40±0.13	0.36±0.06
脾脏指数 Spleen index	0.10±0.03	0.09±0.03	0.10±0.02
42 日龄 42 days of age			
法氏囊指数 Bursa of Fabricius index	0.08±0.02	0.07±0.03	0.10±0.02
胸腺指数 Thymus index	0.18±0.05	0.23±0.07	0.25±0.06
脾脏指数 Spleen index	$0.11±0.04^b$	$0.11±0.03^b$	$0.17±0.03^a$

3 讨 论

3.1 能量限饲对肉鸡生长性能的影响

本试验结果显示，15%和 30%能量限饲显著降低了肉鸡的末重、平均日采食量、平均日增重，30%能量限饲组显著低于 15%能量限饲组；22~28 日龄时各组的料重比无显著差异，但 22~42 日龄时 30%能量限饲组的料重比显著高于 15%能量限饲组和对照组，15%能量限饲组的料重比最低。赵高[15]报道认为，哈伯德肉鸡分别进行能量限制和料量限制饲养，限饲组的平均日增重显著低于自由采食组，料重比显著高于自由采食组，与本试验研究结果相一致。Urdaneta-Rincon

等[16]研究显示，5~42 日龄肉鸡分别进行 5%、10%和 15%的料量限饲，限饲组的 42 日龄体重显著低于自由采食组。Saleh 等[17]研究表明，肉鸡生长早期（7~14 日龄）采用不同能量梯度的饲粮（能量和粗蛋白质比例一致）按鸡对能量的维持需要饲喂，14、21、42、63 日龄体重均显著低于自由采食组，采食量也显著低于自由采食组，而饲料转化率、能量利用效率显著高于自由采食组。Miao 等[18]分别采用 12.12 和 13.37 MJ/kg 的能量水平饲喂肉鸡至 35 日龄，结果发现能量限饲降低了日增重，增加了 1~21 日龄时的饲料转化效率，对 22~35 日龄时的饲料转化效率无显著影响，与本试验的部分结果一致。Deaton[19]研究显示，7~14 日龄肉鸡进行 10%的料量限饲对 41 日龄时体重和整个试验期的生长速度无显著影响，究其原因可能是：1）限饲的时间较短，只有 1 周；2）10%的料量限制，限饲的程度较低。较短时间内的低程度限饲使肉鸡在后期表现出补偿生长效应。

3.2 能量限饲对肉鸡血清指标的影响

免疫球蛋白作为防御病原的分子在适应性免疫系统中发挥重要作用。免疫球蛋白典型的分子结构是由 2 个相同的重(H)链和 2 个轻(L)链组成，H 和 L 链又分为可变区域和恒定区域。根据所含重链的不同，家禽的免疫球蛋白分为 IgA、IgG 和 IgM。免疫球蛋白广泛参与机体免疫应答，免疫球蛋白含量的高低直接影响机体的免疫力强弱。本试验结果显示，15%和 30%能量限饲显著增加了 28 日龄时肉鸡的血清 IgM 含量以及 42 日龄时的血清 IgG 和 IgA 含量。有关能量限饲对肉鸡血清免疫球蛋白含量影响的报道较少，徐德立等[20]报道认为，成年雄性黑线仓鼠进行 10%的料量限饲，连续限饲 21 d，显著增加了血清 IgG 和 IgA 含量。Nayak 等[21]研究认为，大鼠进行 20%和 40%的能量限饲，显著增加了脾脏的 IgG、IgM 和 IgA 细胞数量。Ebersole 等[22]报道认为，能量限饲显著增加了猕猴血清 IgM 和 IgG 含量，与本试验结果相一致。但 Lara-Padilla 等[23]研究显示，小鼠采用隔天禁食的方法连续饲养 18 周，与自由采食相比，隔天禁食显著降低了小鼠小肠和血清 IgA 含量，与本试验结果相反。以上结果不同的原因可能是由于限饲量、饲喂方式不同造成的，但具体机制仍需进一步研究。

作为代谢标记物的空腹血清葡萄糖、甘油三酯、高密度脂蛋白胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇、总胆固醇含量与机体脂肪沉积和代谢相关疾病的发生密切相关。血清甘油三酯和葡萄糖含

量与家禽胴体脂肪含量呈正相关[24-25]。本试验结果显示，15%能量限饲显著降低了 28 日龄时肉鸡的血清高密度脂蛋白胆固醇含量，血清总胆固醇、甘油三酯、低密度脂蛋白胆固醇含量有下降趋势但差异不显著，对血清葡萄糖含量无显著影响。30%能量限饲显著降低了 28 日龄时肉鸡的血清总胆固醇和高密度脂蛋白胆固醇含量，血清甘油三酯和低密度脂蛋白胆固醇含量有降低趋势，对血清葡萄糖含量无显著影响；30%能量限饲显著降低了 42 日龄时肉鸡的血清总胆固醇、高密度脂蛋白胆固醇和甘油三酯含量。赵高[15]研究显示，能量限饲显著降低了肉鸡血清甘油三酯、胆固醇和高密度脂蛋白胆固醇含量，对血清葡萄糖含量则无显著影响，与本试验结果相一致。王佳伟[26]研究报道，30%能量限饲显著降低了血清甘油三酯和葡萄糖含量，极显著降低了血清胆固醇和高密度脂蛋白胆固醇含量，与本试验结果部分一致。陈永如[27]通过高热量饮食诱导了大鼠胰岛素抵抗模型，发现能量限饲显著降低了大鼠血清甘油三酯和胆固醇含量，与本试验结果基本一致。Wei 等[28]选取 100 名健康志愿者，每个月连续 5 d 低脂、低能、低糖、低蛋白质、高不饱和脂肪酸饮食，3 个循环周期，发现受试者的空腹血清葡萄糖、甘油三酯、低密度脂蛋白胆固醇含量降低，高密度脂蛋白胆固醇含量则无显著变化。由此可以推测，能量限饲改善了机体的脂类代谢，减少了体脂沉积。

3.3　能量限饲对肉鸡外周血 T 淋巴细胞亚群的影响

免疫细胞都需要葡萄糖、氨基酸和脂肪酸等营养物质来满足其能量需求[29]。然而过剩的能量摄入会导致肥胖进而引起体内循环激素和营养物质的变化，使循环免疫细胞在代谢激素浓度变化的情况下暴露在富含能量的环境中，过剩的能量环境影响免疫细胞功能从而造成免疫缺陷状态，促进炎症发生[30]。T 细胞除直接介导细胞免疫功能外，在免疫应答过程中还可发挥中枢作用。CD_3^+分子能表达于所有成熟的 T 细胞上，是 T 细胞共同的表面标志，CD_3^+通过将抗原与 T 细胞抗原受体结合所产生的活化信号传递到细胞内并激活细胞，起信息传递的作用[31]；CD_4^+分子存在于辅助性 T 细胞表面，是辅助性 T 细胞表面的标志分子，CD_4^+ T 细胞通过分泌白介素、干扰素等细胞因子，诱导和增强机体免疫应答；CD_8^+ T 细胞是杀伤性 T 细胞表面的标志分子，包括抑制性 T 淋巴细胞和杀伤性 T 淋巴细胞，清除被病毒感染的细胞[32]。本试验结果显示，15%和 30%能量限饲使 28 日龄时肉鸡的外周血 CD_3^+和 CD_4^+ T 淋巴细胞百分含量有增加趋势，30%

能量限饲组的外周血 CD_8^+ T 淋巴细胞百分含量显著高于对照组和 15%能量限饲组。由此可以推测，能量限饲增强了机体免疫力，但过高的能量限饲也可能预示着机体过度活跃的免疫状态。15%和 30%能量限饲使 42 日龄时肉鸡的外周血 CD_3^+、CD_4^+和 CD_8^+ T 淋巴细胞百分含量有增加趋势，但差异不显著。其原因可能是，随着能量限饲时间的延长，CD_3^+、CD_4^+和 CD_8^+ T 淋巴细胞达到了一个相对平衡的状态。Khajavi 等[33]研究发现，暴露在热应激条件下的肉鸡早期限饲，21 日龄时外周血 CD_4^+辅助 T 细胞的比例显著增加，CD_8^+细胞毒性 T 细胞的比例下降，42 日龄时外周血 CD_4^+辅助 T 细胞和 CD_8^+细胞毒性 T 细胞的比例均下降，与本试验结果不完全一致。复杂而协调的信号对于激活和维持 T 淋巴细胞的增殖和分化是必须的，这些信号决定了 T 淋巴细胞的命运和功能，也依赖于生物体的代谢状态。研究也表明营养因素可以影响淋巴细胞的增殖、存活和功能行使[34-35]。有关能量限饲对淋巴细胞及其分泌的细胞因子的影响机制以及如何保持各种复杂的细胞因子之间的平衡仍不清楚，尚需进行进一步研究。

3.4 能量限饲对肉鸡免疫器官指数的影响

鸡的免疫过程主要通过脾脏、胸腺、法氏囊来介导，因此免疫器官的发育程度直接影响鸡的免疫应答，所以促进免疫器官的发育对提高其免疫力至关重要。鸡的免疫力强弱，在一定程度上可通过免疫器官的相对重量即免疫器官指数来反映。免疫器官指数的大小和机体免疫系统的执行能力成正比，因此免疫器官指数的增加或降低意味着免疫功能的变化[36]。28 日龄前是免疫器官发育的关键阶段，这个时期是增强肉鸡免疫功能和对疾病抵抗力的关键时期[37]。

本试验结果表明，30%能量限饲显著增加了 28 日龄时肉鸡的法氏囊指数，对胸腺指数和脾脏指数无显著影响；30%能量限饲显著增加了 42 日龄时的脾脏指数，对法氏囊指数和胸腺指数无显著影响。这与 Chen 等[38]报道的 30%能量限饲可增加肉鸡的脾脏和法氏囊相对重量的结果相一致。刘路路[39]研究显示，15%能量限饲显著增加了三黄鸡的脾脏指数。张书汁[40]研究认为，与自由采食相比，30%能量限饲极显著增加了肉鸡的脾脏指数。本试验中，能量限饲增加了肉鸡的免疫器官指数的结果与前人的研究结果相一致。这说明能量限饲能够在一定程度上促进免疫器官的发育。

4 结　论

① 能量限饲在一定程度上降低了肉鸡的生长性能，限饲的比例越大对生长性能的影响也越大。

② 能量限饲增加了肉鸡血清 IgM、IgA 和 IgG 含量，降低了血清甘油三酯、总胆固醇及高密度脂蛋白胆固醇含量。

③ 能量限饲增加了肉鸡外周血 CD_3^+、CD_4^+和 CD_8^+ T 淋巴细胞百分含量。

④ 30%能量限饲增加了肉鸡 28 日龄时的法氏囊指数和 42 日龄时的脾脏指数。

参考文献：

[1] BOEKHOLT H A,VAN DER GRINTEN P,SCHREURS V V A M,et al.Effect of dietary energy restriction on retention of protein,fat and energy in broiler chickens[J].British Poultry Science,1994,35(4):603–614.

[2] ROBINSON F E,CLASSEN H L,HANSON J A,et al.Growth performance,feed efficiency and the incidence of skeletal and metabolic disease in full-fed and feed restricted broiler and roaster chickens[J].The Journal of Applied Poultry Research,1992,1(1):33–41.

[3] YU M W,ROBINSON F E.The application of short-term feed restriction to broiler chicken production:a review[J].The Journal of Applied Poultry Research,1992,1(1):147–153.

[4] BAGHBANZADEH A,DECUYPERE E.Ascites syndrome in broilers:physiological and nutritional perspectives[J].Avian Pathology,2008,37(2):117–126.

[5] CHAMBERS J R,GAVORA J S,FORTIN A.Genetic changes in meat type chickens in the last twenty years[J].Canadian Journal of Animal Science,1981,61(3):555–563.

[6] INGRAM D K,CUTLER R G,WEINDRUCH R,et al.Dietary restriction and aging:the initiation of a primate study[J].Journal of Gerontology,1990,45(5):B148–B163.

[7] 潘家强,李锦春,谭勋,等.早期限饲对肉鸡免疫器官发育和体液免疫功能的影响[J].中国兽医学报,2005,25(5):527–529.

[8] RICHARDS M P,POCH S M,COON C N,et al.Feed restriction significantly alters lipogenic gene expression in broiler breeder chickens[J].The Journal of Nutrition,2003,133(3):707–715.

[9] 徐良梅,路磊,张慧,等.肉种鸡产蛋中期能量限饲对子代肉鸡生长性能、血液生化指标及肌节

长度的影响[J].东北农业大学学报,2012,43(6):21–26.
[10] 李金锋,徐良梅,张艳云,等.肉种鸡饲粮能量水平对产蛋后期子代生产性能和脂类代谢的影响[J].中国畜牧杂志,2014,50(3):39–43.
[11] MATHIS D,SHOELSON S E.Immunometabolism:an emerging frontier[J].Nature Reviews Immunology,2011,11(2):81–83.
[12] HOTAMISLIGIL G S.Inflammation,metaflammation and immunometabolic disorders[J].Nature,2017,542(7640):177–185.
[13] MOST J,TOSTI V,REDMAN L M,et al.Calorie restriction in humans:an update[J].Ageing Research Reviews,2017,39:36 – 45.
[14] FONTANA L,PARTRIDGE L.Promoting health and longevity through diet:from model organisms to humans[J].Cell,2015,161(1):106–118.
[15] 赵高.能量限制对肉鸡脂肪沉积效应研究及鸡 *Lipin*1 基因的克隆分析[D].硕士学位论文.郑州:河南农业大学,2008:10–14.
[16] URDANETA-RINCON M,LEESON S.Quantitative and qualitative feed restriction on growth characteristics of male broiler chickens[J].Poultry Science,2002,81(5):679–688.
[17] SALEH E A,WATKINS S E,WALDROUP A L,et al.Effects of early quantitative feed restriction on live performance and carcass composition of male broilers grown for further processing[J].The Journal of Applied Poultry Research,2005,14(1):87–93.
[18] MIAO Z,ZHANG G,ZHANG J,et al.Effect of early dietary energy restriction and phosphorus level on subsequent growth performance,intestinal phosphate transport,and AMPK activity in young broilers[J].PLoS One,2017,12(12):e0186828.
[19] DEATON J W.The effect of early feed restriction on broiler performance[J].Poultry Science,1995,74(8):1280–1286.
[20] 徐德立,徐来祥.食物限制对黑线仓鼠免疫功能的影响[J].生态学报,2015,35(6):1882–1890.
[21] NAYAK B N,FRIEL J K,REMPEL C B,et al.Energy-restricted diets result in higher numbers

of CD_4^+,CD_8^+,immunoglobulins (A,M,and G),and CD45RA cells in spleen and CD_4^+,immunoglobulin A,and CD45RA cells in colonic lamina propria of rats[J].Nutrition Research,2009,29(7):487–493.

[22] EBERSOLE J L,STEFFEN M J,REYNOLDS M A,et al.Differential gender effects of a reduced-calorie diet on systemic inflammatory and immune parameters in nonhuman primates[J].Journal of Periodontal Research,2008,43(5):500–507.

[23] LARA-PADILLA E,CAMPOS-RODRÍGUEZ R,JARILLO-LUNA A,et al.Caloric restriction reduces IgA levels and modifies cytokine mRNA expression in mouse small intestine[J].The Journal of Nutritional Biochemistry,2011,22(6):560–566.

[24] WHITEHEAD C C,HOOD R L,HEARD G S,et al.Comparison of plasma very low density lipoproteins and lipogenic enzymes as predictors of fat content and food conversion efficiency in selected lines of broiler chickens[J].British PoultryScience,1984,25(2):277–286.

[25] CAMPOS R L R,NONES K,LEDUR M C,et al.Quantitative trait loci associated with fatness in a broiler-layer cross[J].Animal genetics ,2009,40(5):729–736.

[26] 王佳伟.能量限制对肉仔鸡生产性能以及肝脏基因表达的效应研究[D].硕士学位论文.郑州:河南农业大学,2009:25.

[27] 陈永如.能量限制对大鼠胰岛素抵抗和 *SIRT*1 和 *SIRT*4 表达的影响[D].硕士学位论文.汕头:汕头大学,2010:21–22.

[28] WEI M,BRANDHORST S,SHELEHCHI M,et al.Fasting-mimicking diet and markers/risk factors for aging,diabetes,cancer,and cardiovascular disease[J] Science Translational Medicine,2017,9(377):eaai8700.

[29] WOLOWCZUK I,VERWAERDE C,VILTART O.Feeding our immune system:impact on metabolism[J].Clinical and Developmental Immunology,2008,2008:639803.

[30] MILNER J J,BECK M A.Micronutrients,immunology and inflammation.The impact of obesity on the immune response to infection[J].Proceedings of the Nutrition Society,2012,71(2):298–306.

[31] 易先国,邓凯伟,李卫,等.家禽 CD_3 分子研究进展[J].动物医学进展,2011,32(2):105–107.

[32] 宋辉.鸡生长与免疫抑制综合征病毒对肉仔鸡 CD_3^+,CD_4^+,CD_8^+,SIgA 和 ND,IBD 特异性抗体的影响[D].硕士学位论文.郑州:河南农业大学,2009:55–56.

[33] KHAJAVI M,RAHIMI S,HASSAN Z M,et al.Effect of feed restriction early in life on humoral and cellular immunity of two commercial broiler strains under heat stress conditions[J].British Poultry Science,2003,44(3):490–497.

[34] MACINTYRE A N,GERRIETS V A,NICHOLS A G,et al.The glucose transporter Glut1 is selectively essential for CD_4 T cell activation and effector function[J].Cell Metabolism,2014,20(1):61–72.

[35] SINCLAIR L V,ROLF J,EMSLIE E,et al.Control of amino-acid transport by antigen receptors coordinates the metabolic reprogramming essential for T cell differentiation[J].Nature Immunology,2013,14(5):500–508.

[36] GROSSMAN C J.Interactions between the gonadal steroids and the immune system[J].Science,1985,227(4684):257–261.

[37] 潘家强,孙卫东,谭勋,等.早期限饲对肉鸡体内脂质过氧化作用和抗氧化酶活性的影响[J].畜牧兽医学报,2005,36(5):464–470.

[38] CHEN W,GUO Y M,HUANG Y Q,et al.Effect of energy restriction on growth,slaughter performance,serum biochemical parameters and *Lpin*2/*WDTC*1/mRNA expression of broilers in the later phase[J].The Journal of Poultry Science,2012,49(1):12–19.

[39] 刘路路.能量限制对三黄鸡生长性能、免疫特性及脾脏基因表达的影响[D].硕士学位论文.郑州:河南农业大学,2016:20–21.

[40] 张书汁.能量限制对肉鸡肠道结构及血液生化指标的影响[D].硕士学位论文.郑州:河南农业大学,2009:15–16.

Effects of Energy Restriction on Growth Performance,Serum Indexes and Immune Function of Broilers[1]

*Corresponding author, professor, E-mail: cchenwen@aliyun.com （责任编辑　李慧英）

HUO Wenying[1,2] WANG Zhixiang[1] HUANG Yanqun[1] CHEN Wen[1*]

（1. *Feed Nutrition Engineering Laboratory of Henan Province, Hennan Agricultural University, Zhengzhou* 450002, *China;* 2. *Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou* 450046, *China)*

Abstract: This experiment was conducted to investigate the effects of different energy restriction levels on growth performance, serum indexes, peripheral T lymphocyte subsets and immune function of broilers. Seventy two 22-day-old Cobb broilers were randomly allocated to 3 groups: control group, trial group 1 (15% energy restriction group) and trial group 2 (30% energy restriction group), with 24 replicates per group and 1 broiler per replicate. The experement lasted for 20 days. Broilers were slaughtered and sampled at 28 and 42 days of age. The results showed as follows: 1) the final weight, average dialy feed intake (ADFI) and average dialy gain (ADG) of broilers in 15% and 30% energy restriction groups were significantly lower than those in control group (P<0.05), and those in 30% energy restriction group were significantly lower than those in 15% energy restriction group (P<0.05). The ratio of feed to gain (F/G) in 30% energy restriction group was significantly higher than that in 15% energy restriction group and control group from 22 to 42 days of age (P<0.05). 2) Compared with control group, 15% and 30% energy restriction significantly increased the contents of immunoglobulin M (IgM) in serum of broilers at 28 days of age and immunoglobulin G (IgG) and immunoglobulin (IgA) in serum at 42 days of age (P<0.05), and significantly decreased the content of high density lipoprotein cholesterol (HDL-C) in serum at 28 days of age (P<0.05). 30% energy restriction significantly increased the content of IgA in serum at 28 days of age (P<0.05), and significantly decreased the contents of total cholesterol (TC) in serum at 28 and 42 days of age and triglyceride (TG) and HDL-C in serum at 42 days of age (P<0.05). 3) Compared with control group, 30% energy restriction significantly increased the percentage of peripheral CD_8^+ T lymphocytes of broilers at 28 days of age (P<0.05). 4) Compared with control group, 30% energy restriction significantly increased the bursa of Fabricius index of broilers at 28 days of age and the spleen index

at 42 days of age ($P<0.05$). It is concluded that energy restriction can improve the immune function, reduce blood lipid level and growth performance.

Key words: energy restriction; broilers; immunoglobulin; T lymphocyte subsets; blood lipid level